

# MET-OLAS, Sistema para el pronóstico de las inundaciones costeras y sus aplicaciones

**Autores:** YUNIT JUANTORENA ALÉN  
PEDRO LUIS BEAUBALLET PADRÓN  
REYNALDO CASALS TAYLOR  
NILO HERNÁNDEZ OROZCO

Instituto de Meteorología de Cuba

## Resumen

En este trabajo se propone un método de cálculo que proporcione al pronosticador una herramienta de trabajo para predecir el estado de la superficie marina en condiciones normales y extremas del tiempo, así como pronosticar los desastres naturales por inundaciones costeras a causa de oleaje con un plazo de 24 a 48 horas.

Como producto final se obtuvo el Sistema MET-OLAS que tiene 3 software que garantizan la ejecución de un método de cálculo para el viento en la superficie marina llamado CTVIENTO, otro para el cálculo del oleaje de viento llamado COMAR y el último para el cálculo de la propagación de la energía llamado CLEMAR1, utilizando para esto el espectro de JONSWAP (Hasselmann et al, 1973).

El sistema MET-OLAS se encuentra operativo en el área de pronósticos del Instituto de Meteorología desde 1996, se aplica para el pronóstico del estado de la superficie marina y la ocurrencia de inundaciones costeras por penetraciones del mar en nuestras costas. En total se ha aplicado en más de 30 situaciones meteorológicas y 21 casos de inundaciones costeras.

## Introducción

En Cuba, las primeras técnicas empleadas en el pronóstico de las olas, desarrolladas en la década del 80 usaron relaciones empíricas entre la ola y la velocidad de viento, a partir de ellas se obtuvieron estimaciones importantes par el período y la altura de ola. Basados en el uso de este tipo de soluciones se destacan los métodos realizados por Pérez et al (1994) y Mitrani et al (1984 y 1996). Estas técnicas se desarrollaron teniendo en cuenta la elevación de la superficie marina como una cantidad aleatoria, describiéndose, estadísticamente se describen desde el punto de vista del espectro de la varianza de superficie. Una representación matemática formal de esta superficie usa la componente armónica y expresa el mar como una combinación de un nú-

mero finito de estas componentes, cada una con su amplitud, frecuencia y dirección propia.

Enmarcados en esta técnica se destacan los resultados de Peñate 1990 y Juantorena et al 1996 y 1997.

En este trabajo se propone un método de cálculo que proporcione al pronosticador una herramienta de trabajo para predecir el estado de la superficie marina en condiciones normales y extremas del tiempo, así como pronosticar los desastres naturales por inundaciones costeras a causa de oleaje con un plazo de 24 a 48 horas.

## Sistema MET - OLAS. Detalles Matemáticos y físicos.

En 1997 se desarrolló en Cuba el Sistema llamado MET - OLAS, en el cual la energía de ola se ex-

presa como una función de frecuencias y direcciones. El campo de viento usado en el cálculo de ola se deriva del campo de presión atmosférica en superficie, obtenidos de los mapas del tiempo. Los cuales se emplean para establecer la velocidad de viento, el fetch y la persistencia.

Esta información, combinada con la ecuación del viento geostrofico, permite obtener el campo de viento que se utiliza en MET - OLAS.

$$V_g = \frac{1}{\rho_a f} \frac{\Delta p}{\Delta n} \quad (1)$$

donde :  $V_g$  viento geostrofico

$\rho_a$  densidad del aire

$\frac{\Delta p}{\Delta n}$  gradiente de presión atmosférico

f parámetro de Coriolis.

El siguiente paso es determinar el campo de olas que se genera por el viento calculado, para ello se emplea el espectro de JONSWAP, donde se encontró que el estado del mar puede ser descrito por el comportamiento de los parámetros siguientes de espectro:

$f_m$  : frecuencia pico

$\alpha$  : Phillips's de constante

$\gamma$  : factor de ensanchamiento del pico

$\sigma$  : ancho del pico

El espectro de JONSWAP se expresa como:

$$E(f, \theta) = \alpha g^2 (2\pi)^{-4} f^{-5} \exp\left\{\left[-\frac{5}{4}\left(\frac{f}{f_m}\right)^{-4}\right] + \ln \gamma \exp\left[-\frac{(f-f_m)^2}{2\sigma^2 f_m^2}\right]\right\} * G(\theta) \quad (2)$$

donde  $G(\theta)$  es la función de dispersion angular, y se emplea:

$$G(\theta - \phi) = \frac{2}{9} \cos^4(\theta - \phi) \\ = 0$$

El comportamiento de los parámetros de escala ( $f_m$ ,  $\alpha$ ) puede ser descrito por expresiones que se basan en las relaciones dimensionales de análisis por Kitaigorodskii (Gunther, 1981)

$$f_m^* = 3.5 \left( \frac{gL_F}{U_{10}} \right)^{-0.33} \quad (4)$$

$$\alpha = 0.076 \left( \frac{gL_F}{U_{10}} \right)^{-0.22} \quad (5)$$

donde  $f_m^*$  es la frecuencia pico

$$\text{no dimensional } f_m^* = f \frac{U_{10}}{g}$$

En el sistema MET-OLAS se utilizan los valores medios del espectro de JONSWAP  $\gamma = 3.3$  para olas de viento parcialmente desarrollado,  $\gamma = 1$  para oleaje de viento completamente desarrollado,  $\sigma_a = 0.07$  y  $\sigma_b = 0.09$ .

En términos del espectro discreto la energía total viene dada por:

$$E = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N E(f_i, \theta_j) \Delta f_i \Delta \theta_j \quad (6)$$

donde  $N=23$  es el número de bandas de frecuencias y  $M=15$  es el número de bandas de dirección.

$$\text{for } |\theta - \phi| \leq \pm \frac{\pi}{2}$$

para el resto (3)

El rango de frecuencias se encuentra entre 0.042 y 0.617 Hz, el espectro tiene un ancho de banda de 24°.

La altura significativa de las olas en el área de generación puede ser calculada a partir de la energía total usando la relación:

$$H_{\frac{1}{3}} = 4 * \sqrt{E}$$

Después de calcular la energía de las olas correspondiente a las olas de viento, se determina el mar de leva teniendo en cuenta el mecanismo de propagación, en el cual intervienen varios procesos que disipan la energía de las olas de viento; estos son la dispersión

angular y la longitudinal, la presencia de vientos secundarios fuera de la zona de generación que no sólo disipan, sino que también aumentan la energía y, por último se analizan los procesos de propagación en diferentes direcciones con respecto al eje central.

Según como aparece en OMM (1988, 1997), la dispersión angular ( $D_a$ ) se debe al hecho de que al dejar el área generadora cada componente espectral continua desplazándose con su propia dirección; para el cálculo del proceso se emplea la fórmula obtenida en Juantorena y Beauballet (1996) que depende de la distancia del área generadora hacia el punto de predicción ( $R_p$ ) y del ancho del frente de generación ( $AB$ ).

$$D_a = 0.04 + 1.2 * \text{Exp}\left(-\frac{R_p}{2 * AB}\right) - 3.3 * \text{Exp}\left(-\frac{R_p}{AB}\right) \\ + 6.2 * \text{Exp}\left(-\frac{2R_p}{3 * AB}\right) - 3.08 * \text{Exp}\left(-\frac{2R_p}{AB}\right) \quad (7)$$

La dispersión longitudinal ( $D_l$ ) se debe a la diferencia de velocidades de grupo entre las diversas componentes del espectro, todas en la misma dirección. Para el cálculo de este proceso se utiliza la metodología que aparece en Juantorena y Beauballet 1996.

$$D_L = \frac{\text{energía de la componente espectral}}{\text{energía total del espectro}}$$

Para el cálculo de ambas energías se tendrá en cuenta nuevamente el espectro unidimensional, descrito en la ecuación 1, pues las componentes espectrales se analizan en la misma dirección, por lo que la dependencia con la dirección de propagación no se tiene en cuenta.

Finalmente la altura de las olas de leva se obtienen por la expresión:

$$H_{leva} = H_{viento} \sqrt{D_a} \sqrt{D_l}$$

## Resultados del Sistema MET-OLAS.

La salida del Sistema MET-OLAS está caracterizada por los siguientes resultados:

- Viento Superficial a 10 metros de altura sobre el nivel del mar.
- Altura de la ola de Viento en el área generadora de oleaje.

- Altura de la ola de leva en el área generadora.
- Altura de la ola combinada en el área generadora.
- Grado de Desarrollo de la superficie marina.
- Altura de la ola en el punto de pronóstico (Ej: Malecón habanero y Malecón Baracoa).
- Intensidad de la Inundación (Ligera, moderada y fuerte).
- Hora de inicio y fin de la inundación.

El sistema MET-OLAS se encuentra operativo en el área de pronósticos del Instituto de Meteorología desde 1996, se aplica para el pronóstico del estado de la superficie marina y la ocurrencia de inundaciones costeras por penetraciones del mar en nuestras costas. En total se ha aplicado en más de 30 situaciones meteorológicas y 21 casos de inundaciones costeras (tabla 1).

*Tabla 1: Situaciones Meteorológicas que ocasionaron inundaciones costeras, en las cuales se aplicó el Sistema (1996-2000)*

Situación Meteorológica	Fecha	Intensidad de la Inundación	Lugar de afectación.
Frente Frio Fuerte	8/01/1996	ligera	Ciudad de La Habana
Sistema de altas presiones	5/02/1996	ligera	Ciudad de La Habana
Interacción entre una baja y un anticiclón	7-/02/1996	Ligera	Baracoa
Frente Frio Fuerte	8/03/ 1996	ligera	Ciudad de La Habana
Baja Extratropical	20/03/1996	ligera	Ciudad de La Habana
Huracán Edouard	30/08/1996	ligera	Baracoa
Tormenta Tropical Josephine	7/10/1996	ligera	Ciudad de La Habana
Huracán LILI	15-26 /10/ 1996	fuerte  ligera	Isla de al Juventud Cienfuegos Santi-Spiritud Cayo Largo Villa Clara
Sistema de altas presiones	3/04/1997	ligera	Baracoa *
Baja Extratropical	20/03/1997	ligera	Ciudad de La Habana
Frente Frio Fuerte	29/12/1997	ligera	Ciudad de La Habana
Sistema de altas presiones	3/01/1998	ligera	Baracoa
Baja Extratropical	3-4/03/1998	moderada	Ciudad de La Habana
Huracán GEORGES	23-25/09/1998	ligera a moderada  ligera	Baracoa Holguín Villa Clara Matanzas Havana City Golfo de Batabanó
Huracán MITCH	28-31/10/ 1998	ligera	Golfo de Batabanó
Sistema de altas presiones	2/02/1999	ligera a moderada	Baracoa
Frente Frio Fuerte	15/03/1999	moderada	Ciudad de La Habana
Huracán Floyd	13-15 /10/ 1999	ligera	Holguín

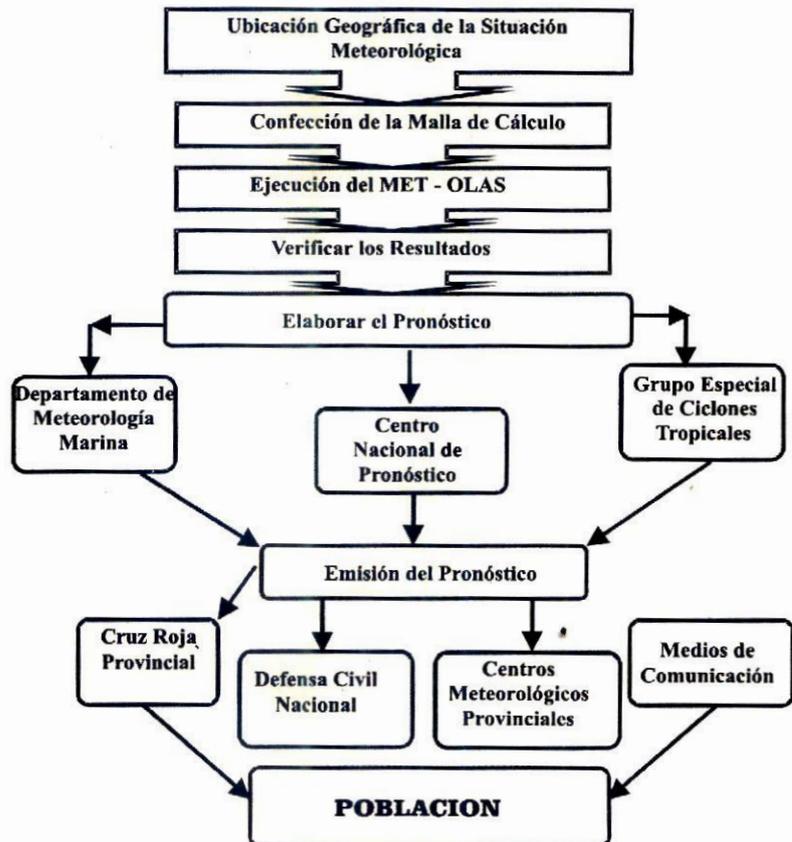
Huracán Irene	14-15/10/2000	ligera	Golfo de Batabanó Ciudad de La Habana
Huracán Debby	24/08/2000	ligera	Ciudad de La Habana
Huracán Gordon	14-17/09/2000	ligera	Ciudad de La Habana Golfo de Batabanó
Huracán Keith	1-3/10/2000	ligera	Golfo de Batabanó Isla de La Juventud

De la tabla 1 podemos concluir que se han pronosticado un total de 24 inundaciones costeras pronosticadas desde 1996-2000, de ellas 19 en la categoría de ligeras, 2 en la categoría de moderadas, 2 de ligera a moderada y una fuerte.

También como se observa en la tabla la Ciudad de La Habana con un total de 13 inundaciones costeras y Guantánamo con un total de 7 inundaciones costeras, son las provincias más afectadas.

El MET-OLAS, se ha aplicado en 21 situaciones meteorológicas que han producido inundaciones de ellas, 10 ciclones tropicales, 3 frentes fríos, 3 bajas extratropicales, el resto (5) se caracteriza por sistemas de altas presiones, zonas de convergencias entre bajas y altas presiones.

Para aplicarlo en modo operativo el sistema se ejecuta siguiendo los pasos que se representan en el siguiente diagrama.



## Conclusiones

De modo general se puede concluir a través del Sistema MET-OLAS, se obtuvo una herramienta de trabajo para predecir el estado de la superficie marina y el pronóstico de la ocurrencia de las inundaciones costeras. Se pudo estudiar por primera vez el oleaje de viento y el oleaje de leva de forma separada, así como calcular por primera vez la propagación de la energía fuera de las áreas generadoras de oleaje.

Con el MET-OLAS se han pronosticado 24 inundaciones costeras y las provincias más afectadas son la Ciudad de La Habana y Baracoa.

Recomendamos continuar perfeccionando las técnicas de predicción de oleaje pues las inundaciones costeras constituyen una amenaza permanente a la vida humana y al desarrollo socioeconómico de las zonas costeras de Cuba, donde transcurren las actividades

de más de un millón de personas. Además permiten realizar un pronóstico preciso y oportuno de un peligro potencialmente destructivo, que puede salvar vidas humanas y permite tomar las medidas con antelación para reducir los daños económicos.

## Referencias

-**Gunther H. (1981)**: A parametric surface wave model and the statistics of the prediction parameters. Max Planck Institute für Meteorologie. 90 pp.

-**Hasselmann K., T.P. Barnett, E. Bouws, H. Carlson, D.E. Cartwright, K. Enke, H. Gienapp, D.E. Hasselmann, P. Krusemann, A. Meerburg, P. Müller, D.J. Olbers, K. Richter, W. Sell and H**

**Walden, (1973)**: Measurements of wind - wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP), Deut. Hydrogr. Z., A8 (12)

-**Juantorena Y P. Beauballet, (1996)**: Método de Cálculo para la predicción del mar de leva. Boletín Virtual de SOMETCUBA. Vol.2, No.2

-----, **P. Beauballet, M. Sosa. (1997)**: Cálculo del oleaje en los sistemas frontales por técnicas espectrales. Informe final de resultado científico. INSMET.

-**Mitrani I., M. Fontova., L. DRaz., J. Gonzalez. ( 1984)**: Determinación del régimen de oleaje y viento en la costa norte de La Habana. IV Exposición Forjadores del Futuro, Centro de información y Divulgación de las BTJ Código D. 5625 Mit. D, 15 pp.

-----, **R. Parrado, R. Vega, L. Díaz, I. Salas, A del Sol, R. Casals, P. P. Jrez ( 1996)**: El oleaje extremo en las costas de Cuba.. Informe final de resultado científico. INSMET.

-**OMM, (1988)**: Guía para el análisis y pronóstico de las olas. No 702.

-**OMM, (1997)**: Guía para el análisis y pronóstico de las olas. No 702.

-**Peñate, (1990)**: Desarrollo de un método objetivo de diagnóstico y pronóstico del campo de ola en los mares adyacentes a Cuba. Tesis de Doctorado. 136 pp.